



止於至善

# 第三篇 异步电机

## 第九章

### 异步电机的理论分析与运行特性

東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU


## 2. 异步电机的运行状态和磁场

### ➤ 电磁过程

- 异步电动机定子上有**三相对称的交流绕组**
- 三相对称交流绕组通入**三相对称交流电流**时，将在电机气隙空间产生**旋转磁场**
- 转子绕组的导体处于旋转磁场中，**切割磁力线**，并产生**感应电势**（判断感应电势方向）
- 转子导体通过端环自成闭合回路，流过**感应电流**
- **感应电流**与**旋转磁场**相互作用产生**电磁力**（判断电磁力的方向）
- **电磁力**作用在转子上将产生**电磁转矩**，并驱动转子旋转
- 根据以上**电磁感应原理**，异步电动机也叫**感应电动机**

東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>


1	选项	试题 在异步电机中，须（ ），才能工作。
		A 将转子绕组接入交流电源 B 将定子绕组接入交流电源 C 将定子绕组和转子绕组同时接入直流电源 D 将定子绕组和转子绕组同时接入交流电源
2	试题	某三相异步电动机，额定电压和电流分别为380V、100A，额定效率为0.85，额定功率因数为0.8，则该电机的额定输入功率为（ ）。
	选项	A 38kW    B 65.8kW    C 55.9kW    D 52.7kW E 44.7kW


 东南大学电气工程学院  
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU  
 南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 2. 异步电机的运行状态和磁场

➤ 异步电机的运行状态

- 三种运行方式 转差率  $s$ ,  $s=(n_1-n)/n_1$ 
  - ❖ 电动机运行
  - ❖ 发电机运行
  - ❖ 电磁制动
- 分析时，从作用于转子上的电磁力或电磁转矩（*torque*）的方向，以及定子电势  $e$  和定子电流  $i$  有功分量所产生的电功率的正负来判断电机的运行状态


 东南大学电气工程学院  
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU  
 南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## I. 电动机运行

- 电能转化成机械能
- 当一对称的三相电流通入异步电机的定子绕组，在空气隙中便产生一旋转磁场以同步转速  $n_1$  旋转
- 条件：转子导体切割磁力线，并产生感应电势
- 转子导体中的感应电流与旋转磁场相互作用，使转子导体上受到一电磁力  $F_e$ ，其方向与旋转磁场的旋转方向相同
- 在电磁力的作用下形成电磁转矩，拖动转子顺着旋转磁场方向旋转

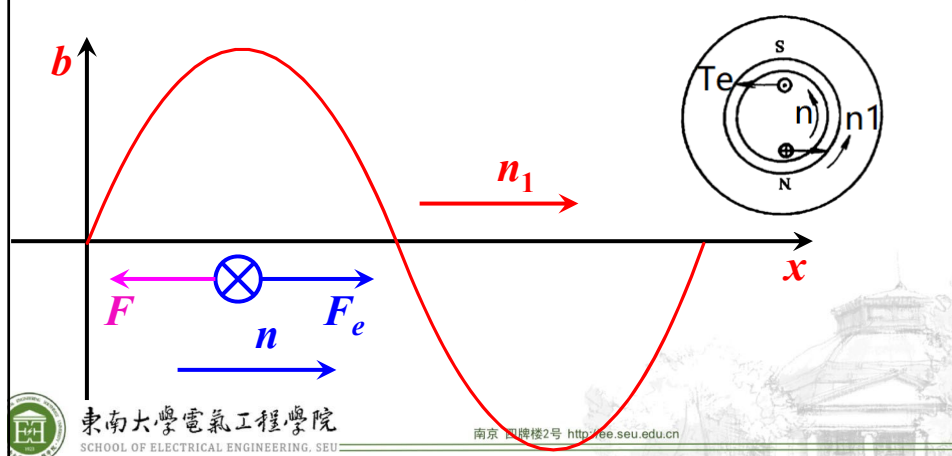


东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## I. 电动机运行

- 电磁力  $F_e$  为原动力，相应的电磁转矩为驱动转矩，负载力  $F$  为阻力，相应的转矩为阻力矩
- 转子必须与旋转磁场保持一定的速度差



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## I. 电动机运行

- 在电动机状态， $n$  总小于同步转速  $n_1$ ，旋转磁场切割转子的相对转速为  $n_1 - n$ ，称为转差速度  $slip$
- 转差率  $s$ ：转差速度与同步转速的比值

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

- 转子绕组中的感应电势的大小与转差速度成正比，即与转差率成正比
- 空载转差率：< 0.5%
- 满载转差率：< 5%

## I. 电动机运行

### 结论：

- 异步电动机的转速常在同步转速以下
- 转子的转速在  $0 < n < n_1$  范围内，即在  $0 < s < 1$  范围内
- 从能量角度，定子绕组从电网吸收电功率，转化为转子的机械能输出



问题 异步电动机空载运行时，转差率的大小为（）

- 3 选项
- A 接近于1，但小于1
  - B 接近于1，但大于1
  - C 接近于0，但小于0
  - D 接近于0，但大于0

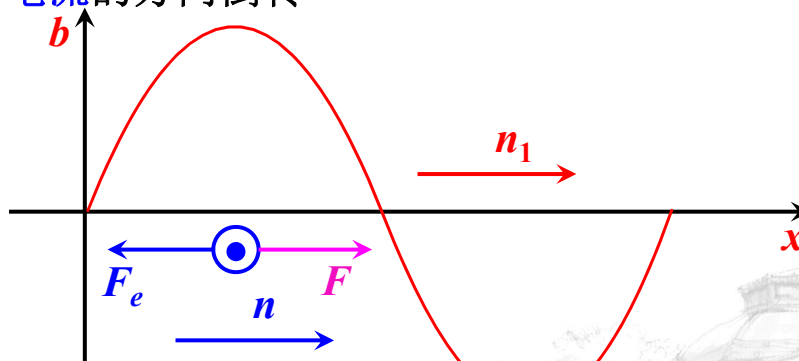


东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 发电机运行

- 在转子上施加原动力矩拖动转子以大于同步转速顺着旋转磁场方向旋转
- 和电动机运行情况相比，转子导体中感应电势和电流的方向倒转



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 发电机运行

- ▶ 导体上所受到的**电磁力**的方向与转子**旋转方向****相反**
- ▶ 输入**机械功率**，输出**电功率**，外施力 **$F$** 为原动力，电磁力 **$F_e$** 为阻力，做**发电机**运行
- ▶ **结论：**  
异步电机作为发电机运行，转速需大于同步转速，即  **$n > n_1$** ， **$s < 0$**

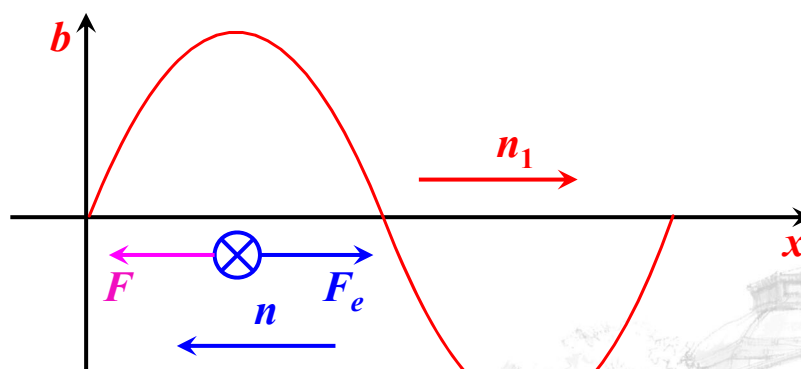


东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## III. 电磁制动

- 转子在**外力**拖动下使其**旋转方向**与**旋转磁场**的旋转方向**相反**
- 旋转磁场切割转子导体的**相对转速****大于同步转速**



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

### III. 电磁制动

- 电磁力的方向与外施力方向相反，所起的作用  
是制动作用
- 电磁制动状态：定子从电网吸收电功率，外力  
供给机械功率，都转变为电机内部的损耗
- 电机的转速 $n$ 应取负值，相对转速大于同步转速，  
即  $n < 0$ ， $s > 1$
- 例：当起重机下放重物时，如不采取任何措施，  
重物将加速下坠。这时如使电机运行在制动状  
态，由电磁转矩制止转子的加速

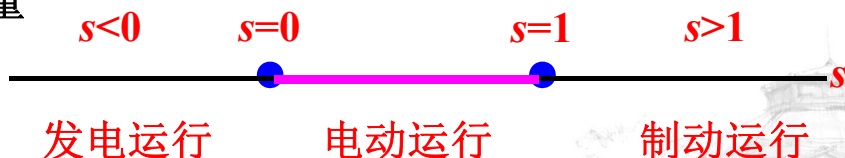


东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

### 小 结

- 重点掌握：异步电机的基本作用原理
- 异步运行的基本条件：异步电机转子与定子基  
波旋转磁场之间存在有相对运动，在闭合的转  
子导体中将出现感应电势、电流。于是，产生  
电磁转矩，其相对运动状况用转差率  $s$  来表示
- $s$  是反映异步电机运行状态和负载情况的基本变  
量



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

4 试题 三相异步电机转速为 $n$ ，定子旋转磁场的转速为 $n_1$ ，当 $n$ 与 $n_1$ 反向时，电机运行于（ ）状态。

选项 A 电动机 B 发电机 C 电磁制动 D 不确定

5 问题 三相异步电机转速为 $n$ ，定子旋转磁场的转速为 $n_1$ ，当 $n$ 与 $n_1$ 反向时，此时转差率 $s$ 的大小为（ ）

选项 A  $s < -1$  B  $-1 < s < 0$  C  $0 < s < 1$  D  $s > 1$



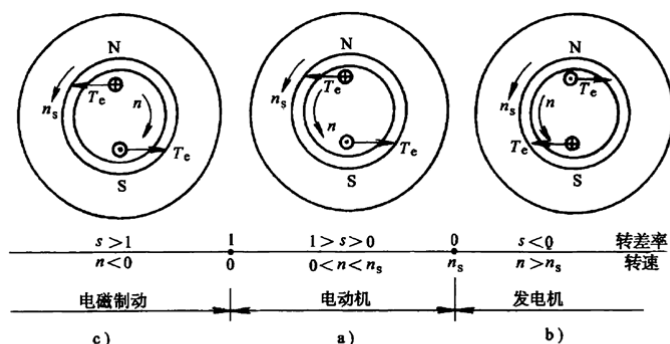
东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 三种运行方式

$$n_1 = n_s$$



感应电机的三种运行状态（图中 N, S 代表气隙旋转磁场，• 和 × 表示转子感应电动势和转子电流有功分量的方向）



东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



## 异步电机的磁场

- **空载时**：异步电机定子三相绕组流入三相电流产生旋转磁场，其转速为**同步速** $n_1=60f/p$ 。此时，转子转速近似为同步速，转子中电流很小可忽略不计，**气隙**中仅存在**定子旋转磁场**
- **负载时**：电机转速从 $n_1$ 下降为 $n$ ，定子电流增大，转子绕组中产生**感应电流**，并也产生**转子磁势**建立**转子磁场**



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 异步电机的磁场

- 转子感应电流的频率为  $f_2=p(n_1-n)/60=sf_1$
- **转子电流**所产生的旋转磁场相对**转子的**转速  $n_2=60f_2/p=60sf_1/p=sn_1=n_1-n$
- **转子电流**所产生的旋转磁场相对**定子的**转速  $n_2+n=n_1-n+n=n_1$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 异步电机的磁场

### ➤重要结论:

- 转子电流产生的旋转磁动势的转速与定子电流产生的旋转磁动势的转速相同，都等于同步转速  $n_1$
- 定子和转子磁势在空间始终保持相对静止，与转子的实际转速大小无关
- 气隙磁场由转子磁场和定子磁场合成
- 异步电机定、转子磁场与变压器一、二次磁场一样，都符合磁动势平衡原则



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 2. 异步电机的运行状态和磁场

### ➤主磁通和漏磁通

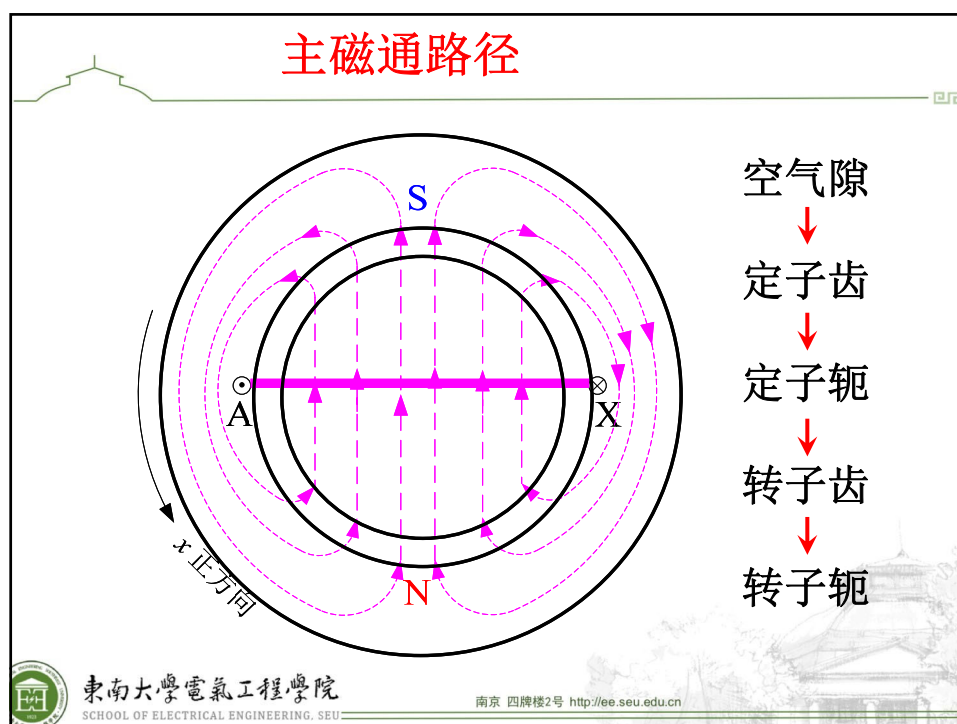
主磁通 (mutual flux)  $\Phi_m$

- 由基波磁势产生，是每极的基波磁通量
- 交链定子绕组与转子绕组，实现能量的传递
- 以同步速旋转
- 主磁通途经五段磁路：空气隙、定子齿、定子轭、转子齿和转子轭



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

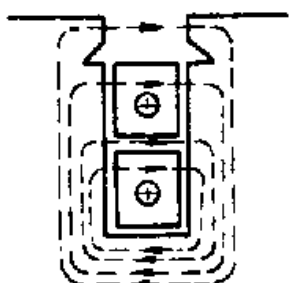


### 定子漏磁通 (stator leakage flux) $\Phi_\sigma$

- **漏磁通**：除去主磁通以外的磁通
- 漏磁通包含三个部分：**槽漏磁通**、**端部漏磁通**和**谐波漏磁通**（按路径区分）
- **槽漏磁通**和**端部漏磁通**，仅只交链**定子绕组**，与**转子绕组**没有互感作用，**不传递能量**
- **谐波漏磁通**：由高次谐波磁势所产生的谐波磁通，穿过空气隙，交链转子绕组并在其中感应电势，产生附加电磁转矩（**无用**），数值上等于气隙总磁通减去气隙基波磁通

东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU  
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 定子漏磁通 (stator leakage flux) $\Phi_\sigma$



横穿定子槽



交链定子绕组端部

定子的槽漏磁通和端部漏磁通，只交链定子绕组，与转子绕组没有互感作用，不传递能量



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 谐波漏磁通

- 谐波磁场极对数  $p_v = \nu p$
- 谐波磁场旋转速度  $n_v = n_1 / \nu$
- 在定子绕组上的感应电势

$$f_{1\nu} = \frac{p_v n_v}{60} = \frac{p n_1}{60} = f_1$$

- 频率仍为基波频率，与其它定子漏磁通感应的电势频率一样，归为定子漏磁通



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 谐波漏磁通

- **谐波**磁场在**转子绕组**的感应电势频率为

$$f_{2\nu} = \frac{p_\nu(n_\nu - n)}{60} = \frac{\nu p \left( \frac{n_1}{\nu} - n \right)}{60}$$

- **基波**磁场在**转子绕组**中感应电势频率为

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60}$$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 异步电机与变压器比较

### ► 变压器:

- **主磁通**: **脉动**磁通,  $\Phi_m$  表示振幅
- **感应电势**: 原、副边绕组静止, **磁通幅值按正弦变化**, 产生感应电势

### ► 异步电机:

- **主磁通**: **旋转**磁通, 沿气隙按正弦分布且以同步速旋转
- **感应电势**: 主磁通与转子有相对运动, **磁通幅值不变化**, 转子匝链磁链变化, 产生感应电势



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

### 3. 三相异步电机的等效电路

- 转子不动时的异步电机
- 转子转动后的异步电机



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

### I. 转子不动时的异步电机

分析前提:

- 把异步电机的磁通分成主磁通和漏磁通，并把谐波漏磁通归并到漏磁通
- 假设：气隙中只有基波磁通，定、转子绕组上只感应有基波电势
- 漏磁感应电势用漏抗压降表示

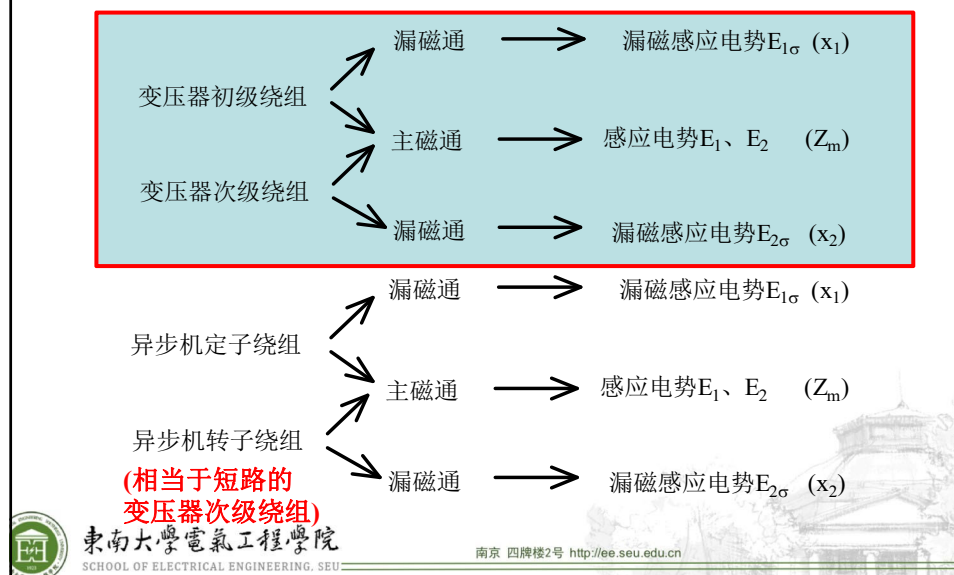


東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

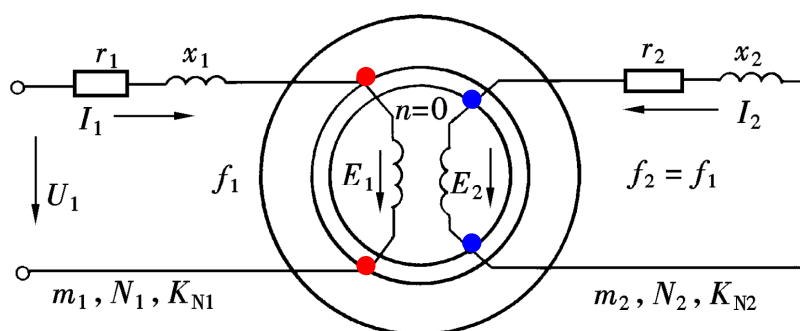
# I. 转子不动时的异步电机

从内部电磁过程看，变压器和异步电机很类似：



# I. 转子不动时的异步电机

## 1. 电压平衡式



正方向按变压器惯例

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) \quad 0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(r_2 + jx_2)$$



# I. 转子不动时的异步电机

## 2. 磁动势平衡式

- 转子绕组是一**对称多相绕组**，与定子绕组有**相同极数**
- 绕线式转子有明显的相数和极对数，设计转子绕组时，必须使**转子极数等于定子极数**。否则，没有**平均电磁转矩**
- 鼠笼式转子由鼠笼加端环组成，所有导条在两头被端环短路，整个结构是对称的，实质上是一个对称的多相绕组。**鼠笼转子的极数恒等于定子绕组的极数**



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 转子不动时的异步电机

## 2. 磁动势平衡式

- 转子不动时，定、转子电势有**相同频率**。由**转子电流**所产生的**基波旋转磁势**与由**定子电流**所产生的**基波旋转磁势**有**相同转速**，**无相对运动**
- **转子**旋转磁势对**定子**旋转磁势产生**去磁**作用，二者共同作用在主磁路中产生**主磁通**，决定于定子电势  $E_1$  
$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 K_{N1} \Phi_m$$
- $E_1$  受到定子电压  $U_1$  平衡支配，决定了基波磁通  $\Phi_m$ ，从而决定了励磁电流  $I_m$



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



# I. 转子不动时的异步电机

## 2. 磁动势平衡式

- 当转子有电流时，定子电流应包含两个分量

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

- 由定子电流所产生的磁势也包含两个分量

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_m + \dot{F}_{1L}$$

- 第一项用以产生基波磁通
- 第二项为负载分量，用以抵消转子磁势去磁作用，它与转子磁势大小相等方向相反



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

- 设定子绕组有  $m_1$  相，定子磁势振幅

$$F_1 = \frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 K_{N1}}{p} I_1$$

- 设转子绕组有  $m_2$  相，转子磁势振幅

$$F_2 = \frac{m_2}{2} * 0.9 * \frac{N_2 K_{N2}}{p} I_2$$

- 合成（励磁）磁势  $F_m = \frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 K_{N1}}{p} I_m$

- 转子静止时：  $f_1 = f_2$  (磁势速度与同步速一致)

- 磁势平衡式  $F_m = F_1 + F_2$

$$\frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 K_{N1}}{p} I_m = \frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 K_{N1}}{p} I_1 + \frac{m_2}{2} * 0.9 * \frac{N_2 K_{N2}}{p} I_2$$



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>